**УДК 504.06:669:338.2**

Кадушко Даниил Александрович, студент
Плешко Виктор Русланович, студент
(Филиал РГСУ, г. Минск, Беларусь)
Danila A. Kadushko, student
Viktor R. Pleshko, student
(Branch of RSSU, Minsk, Belarus)

# РЕЦИКЛИНГ РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫХ МЕТАЛЛОВ: ЭКОЛОГО-ЭКОНОМИЧЕСКИЕ И УПРАВЛЕНЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ

# RECYCLING OF RARE EARTH METALS: ENVIRONMENTAL, ECONOMIC AND MANAGERIAL ASPECTS

Аннотация. Рециклинг редкоземельных металлов рассматривается как ответ на дефицит критического сырья. Показано, что низкие показатели переработки (1 – 8 %) определяются экономическими, технологическими и институциональными барьерами, а не геологией. Предложены управленческие решения на трёх уровнях управления.

Ключевые слова: редкоземельные металлы, рециклинг, критическое сырьё, циркулярная экономика, электронные отходы, расширенная ответственность производителя.

Annotation. Rare earth recycling is examined as a response to critical raw material shortages. Low recycling rates (1–8 %) are shown to result from economic, technological and institutional barriers rather than geology. Managerial measures are proposed at the corporate, state and international levels.

Key words: rare earth elements, recycling, critical raw materials, circular economy, e-waste, extended producer responsibility.

Переход к низкоуглеродной энергетике изменил структуру спроса на минеральное сырьё: технологии, призванные снизить зависимость от углеводородов, сами стали источником сырьевой уязвимости. Для сопоставимой мощности ветровая и солнечная генерация, электромобили и накопители энергии требуют в 10 – 15 раз больше минерального сырья, чем традиционная энергетика [1]. Особое место занимают редкоземельные металлы (РЗМ) – 17 элементов, без которых невозможно производство постоянных магнитов, катализаторов и люминофоров.

В частности, постоянные магниты из сплава неодима, железа и бора (NdFeB) устанавливаются в генераторы ветроустановок, тяговые электродвигатели электромобилей и промышленные приводы. Именно на этот сег-

мент приходится основная часть мирового потребления неодима и празеодима [3]. Поставки при этом заметно менее диверсифицированы, чем по большинству других минералов: на Китай приходится порядка 60 % добычи и до 90 % мощностей по разделению и рафинированию [4].

Таким образом, спрос растёт, а разведанные запасы ограничены, качество руд снижается, экологические требования к добыче ужесточаются, что в научной литературе отражается понятием «ресурсный потолок» [2]. Добавим, что ограничение связано и с тем, как организованы материальные потоки. В отработавших магнитах и электронике концентрация РЗМ выше, чем в природных рудах [3]. Задача работы – выяснить, какие эколого-экономические и управленческие условия позволяют перейти от отдельных практик рециклинга к системному снабжению критическим сырьём. Для этого оценивается место РЗМ среди критического сырья, систематизируются экологические эффекты и анализируется экономика рециклинга.

Исследование литературы выявило, что категория критических сырьевых материалов (Critical Raw Materials, CRM) вошла в повестку ЕС и США в 2010-е годы: критическими называют минералы, у которых одновременно высока экономическая значимость и высок риск сбоев поставок [5]. Основополагающим является обзор К. Биннеманса с соавторами, систематизировавший источники редкоземельного вторичного сырья и причины, по которым рециклинг РЗМ не вышел на промышленный уровень: извлечение из отработавшей продукции не превышает 1 %, а наибольший потенциал сосредоточен в постоянных магнитах [3]. Дж. Рademакер с соавторами показали, что вторичное сырьё покроет лишь часть спроса, поэтому рециклинг не может считаться универсальной заменой первичной добыче [6].

Институциональные рамки добычи и вторичной переработки критических сырьевых материалов формируется прежде всего в Европейском союзе. Так, Закон о критических сырьевых материалах (Регламент (ЕС) 2024/1252) устанавливает ориентиры на 2030 год: не менее 10 % стратегического сырья добывать внутри ЕС, 40 % перерабатывать и 25 % получать из рециклинга [7]. Регламент о батареях (ЕС) 2023/1542 требует эффективности переработки 65–80 % и извлечения 90 % кобальта, меди, свинца и никеля и 50 % лития [8]. РЗМ столь жёсткими нормативами не охвачены, и это, по мнению европейских аудиторов, одна из причин отставания: цели сформулированы без привязки к конкретным элементам, поэтому извлечение «сложных» материалов экономически невыгодно [9].

Данные показывают, что отставание сохраняется. Вторичное сырьё составляет только 6,9 % из 106 млрд т материалов, ежегодно вовлекаемых в глобальный оборот, причём с 2015 г. этот показатель снизился на 2,2 п. п. [10]. Из 26 материалов, критичных для «зелёного» энергоперехода, у семи уровень рециклинга находится в пределах 1–5 %, десять практически не перерабатываются, а средний показатель по 34 критическим материалам в ЕС

не превышает 8,3 % [9]. В литературе такое положение объясняют эффектами блокировки. Низкие цены первичного сырья и субсидии добывающему сектору не создают стимулов для инвестиций в сортировку и разделение сплавов [11]. На экономику городской добычи влияют также конструкция изделий и наличие инфраструктуры сбора [12].

Российский контекст представлен преимущественно прикладными и нормативными работами: страна, располагая значительной сырьевой базой, проигрывает в технологиях переработки и рискует закрепиться в роли поставщика концентратов [13]. Вместе с тем, в апреле 2025 года в Самарской области запущен опытно-промышленный участок по извлечению неодима, диспрозия и празеодима из отходов производства магнитов и электронного лома с заявленным извлечением свыше 95 % при целевом показателе 99,5 % [13]. Утверждается «дорожная карта» развития добычи и производства редких и редкоземельных металлов, пилотные проекты намечены в Мурманской области и Башкортостане [14]. Технологии и регуляторные ориентиры описаны подробно, тогда как экологические, экономические и управленческие аспекты рециклинга рассматриваются изолированно; настоящая работа связывает их в единую рамку.

Исследование, проведенное авторами, опирается на материалы Всемирного банка [1], ЮНЕП [2], Circle Economy [10], Европейской счётной палаты [9], нормативные документы ЕС [7, 8], перечень критических сырьевых материалов для ЕС [5], данные Международного энергетического агентства [4], научные обзоры по рециклингу РЗМ [3, 6], исследования барьеров циркулярности [11] и R-стратегий для электронных отходов [12], российские источники [13–15]. Методологическую основу образуют системный и институциональный анализ: первый позволяет рассматривать редкоземельный цикл как единый поток «добыча – производство – потребление – обращение с отходами» и оценивать эффекты на каждой стадии; второй служит для выявления норм, удерживающих линейную модель. Кроме того, использованы сравнительный анализ регуляторных рамок ЕС и России, кейс-стади (проект в Самарской области [13]) и группировка барьеров по трём признакам. Ограничения работы связаны с неполнотой сопоставимых данных: коэффициенты извлечения РЗМ публикуются фрагментарно, поэтому выводы сформулированы как качественные обобщения.

Результаты исследования представлены в четырёх блоках: место РЗМ в структуре критического сырья; экологические аспекты рециклинга; экономические аспекты; управленческие условия.

***1. Редкоземельные металлы в структуре критического сырья.*** Спрос на РЗМ растёт быстрее, чем на многие другие минералы. Всемирный банк оценивает, что для развёртывания безуглеродной генерации и систем хранения энергии потребуется свыше 3 млрд т минералов; предложение никеля придётся увеличить на 208 %, меди — на 156 % к уровню 2020 г., а спрос на графит, литий и кобальт к 2050 г. вырастет почти на 500 % [1].

UNEP прогнозирует трёхкратный рост потребления критических минералов к 2030 г. и четырёхкратный — к 2040 г. [2]. Наибольшую ценность представляют неодим, празеодим, а также тяжёлые элементы — тербий и диспрозий [3]. Полноценной замены постоянным магнитам в тяговых электродвигателях и генераторах ветроустановок пока нет.

Наибольшей ценностью обладают неодим, празеодим и тяжёлые элементы – тербий и диспрозий [3]; полноценной альтернативы постоянным магнитам в тяговых электродвигателях и генераторах ветроустановок не существует.

Показатели рециклинга при этом низки: извлечение РЗМ из отработавшей продукции не превышает 1 % [3]; в ЕС у семи из 26 материалов, критичных для энергоперехода, уровень переработки составляет 1–5 %, десять практически не перерабатываются, а средний показатель по 34 критическим материалам не превышает 8,3 % [9]. РЗМ одновременно наиболее критичны и наименее вовлечены в циркулярный оборот – в этом состоит центральное противоречие.

***2. Экологические аспекты.*** Первичное производство РЗМ связано с существенной экологической нагрузкой: по оценкам UNEP, добыча и переработка минерального сырья ответственны за более 90 % потерь биоразнообразия и водного стресса и за 55 % выбросов CO2 [2]. Для редкоземельного сегмента эффекты усиливаются: руды перерабатываются кислотным выщелачиванием, а извлечение из кор выветривания ведётся подземным выщелачиванием сульфатом аммония, что загрязняет подземные воды аммонийным азотом и требует дорогостоящей рекультивации; минералы-носители (монацит) содержат торий и уран, поэтому образуются радиоактивные отходы, обращение с которыми наиболее затратно и социально чувствительно [3].

За счёт рециклинга часть этих эффектов снимается. Вторичное сырьё уже прошло добычу и обогащение, поэтому его переработка не требует вскрытия новых месторождений, не образует радиоактивных хвостов и связана с меньшим расходом энергии. Для постоянных магнитов важен и короткий цикл: сплав можно вернуть в производство магнитов, не разделяя его на индивидуальные оксиды [12].

При этом рециклинг нельзя считать заранее «зелёной» технологией. Гидрометаллургические маршруты включают много стадий и требуют больших объёмов кислот, экстрагентов и воды. Биовыщелачивание экологичнее, но длится неделями. Гибридные схемы с ионными жидкостями селективны, однако дороги из-за реагентов и нестабильны [12]. Остаются риски, связанные со сбором и транспортировкой отходов: неформальная переработка электронного лома и трансграничное перемещение отходов переносят нагрузку в страны с более слабым экологическим регулированием [9, 12]. Отдельная проблема – незамкнутость потока: значительная часть ежегодно

выбывающей электроники не попадает в организованный сбор [15]. Поэтому экологический эффект рециклинга зависит не столько от технологии, сколько от организации цепочки [9].

Экологический эффект рециклинга определяется поэтому не технологией, а организацией цепочки [9].

***3. Экономические аспекты.*** Экономика рециклинга РЗМ определяется ценой первичного сырья, затратами на сбор и разделение и структурой стоимости элементов. Цены первичного сырья искажены: стоимость металла из руды не учитывает ни экологический ущерб, ни исчерпание запасов, а добывающие компании нередко получают субсидии, поэтому новый металл часто дешевле переработанного; капитальные затраты усиливают эффект блокировки [11].

Затраты распределены по стадиям неравномерно: наиболее дешёвы сбор и предварительная разборка, наиболее дорого разделение индивидуальных элементов. В припое медь и олово связаны на молекулярном уровне, а редкоземельные элементы из постоянных магнитов требуют многостадийных гидрометаллургических операций [12], поэтому наиболее привлекательны «короткие» маршруты возврата сплава в производство магнитов и маршруты, ориентированные на дорогие тяжёлые элементы – диспрозий и тербий. Конкурентное преимущество вторичного сырья – концентрация: в отработавших NdFeB-магнитах на РЗМ приходится около 30 % массы против единиц процентов в природных рудах [3]; Umicore на заводе в Хобокене извлекает из электронного лома 17 металлов [12], а рынок городской добычи растёт с 25,3 млрд долларов в 2025 году до прогнозируемых 72 млрд долларов к 2032 году [12], но формируется вокруг драгоценных и цветных металлов.

Для редкоземельного сегмента экономика сложнее: объёмы магнитов в отдельных потоках отходов невелики, логистика сбора затратна, цены на неодим и празеодим подвержены резким колебаниям. Российская практика подтверждает, что целесообразность достижима при комплексном извлечении: опытно-промышленный участок в Самарской области заявляет извлечение РЗМ выше 95 % при целевом 99,5 % и планирует объём не менее 170 тонн в год [13]. Системные ограничения сохраняются: сбор и сортировка электронных отходов обеспечены инфраструктурой недостаточно, механизмы расширенной ответственности производителя не выстроены, пилотные проекты с трудом получают «зелёное» финансирование [15]; запасы сами по себе не обеспечивают технологического суверенитета, и страна с богатой сырьевой базой может закрепиться в роли поставщика концентратов [13].

***4. Управленческие аспекты.*** Причины низких показателей переработки группируются по трём направлениям, и каждому соответствует свой набор управленческих инструментов. Экономические барьеры – искажён-

ные цены, субсидии первичному сектору, капитальные ограничения – снимаются не столько субсидированием рециклинга, сколько выравниванием условий: включением экологических издержек в цену первичного сырья и долгосрочными гарантиями спроса на вторичное сырьё [11]. Технологические барьеры (сложность разделения сплавов, медленное биовыщелачивание, дорогие селективные реагенты [12]) требуют организации масштабирования: стабильного объёма однородного сырья, стандартизации входящих потоков и кооперации переработчиков с производителями магнитов.

Институциональные барьеры наиболее значимы, поскольку определяют, доходит ли изделие до переработчика: отсутствие расширенной ответственности производителя; регуляторная фрагментация – несовместимые классификации отходов и различия в трансграничных правилах; цели по рециклингу без привязки к конкретным элементам, из-за чего извлечение РЗМ из электроприводов экономически невыгодно [9, 11].

Ответом становится смена логики корпоративной стратегии – от владения ресурсом к управлению потоками: городская добыча (urban mining), замкнутые цепочки поставок (closed-loop supply chains), дизайн для переработки (design for recycling), цифровые паспорта продуктов (digital product passports), сервитизация и аренда вместо продажи с обязательным возвратом техники [12]. На корпоративном уровне это означает включение показателей рециклинга критических материалов в отчётность и развитие цифровой прослеживаемости поставок; на государственном – закрепление расширенной ответственности производителя для электроники, батарей и транспортных средств [8], создание инфраструктуры городской добычи (сети сбора и сортировочные центры), гармонизацию стандартов вторичного сырья и упрощение трансграничного перемещения отходов [9], финансирование пилотных проектов [14]; на международном – присоединение к принципам ответственного снабжения критическими энергопереходными минералами [2] и обмен технологиями рециклинга.

Российская повестка формируется: утверждается «дорожная карта» развития редких и редкоземельных металлов, пилотные проекты намечены в Мурманской области и Башкортостане [14], техногенные месторождения превращаются в сырьевой резерв; однако без инфраструктуры сбора и доступного финансирования эти проекты останутся точечными решениями [15].

Проведённый анализ позволяет сформулировать четыре вывода. Ограничение рециклинга РЗМ носит управленческий, а не геологический характер: вторичное сырьё содержит редкоземельные металлы в концентрациях, превышающих природные руды, технологии извлечения известны и в отдельных проектах дают свыше 95 % [3, 13], а низкие средние показатели (1–8 %) объясняются организацией сбора, разделения и рынка вторичного

сырья [9]. Экологические выгоды реализуются лишь при управляемом жизненном цикле, когда отходы попадают в организованный сбор, а переработка не переносит нагрузку на другие территории [9, 12].

Экономика рециклинга пока проигрывает первичному производству из-за искажённых цен. Первичное сырьё не несёт экологических издержек и поддерживается субсидиями, поэтому инвестиции в разделение сплавов не окупаются [11]. Наиболее жизнеспособны короткие маршруты возврата магнитов в производство и комплексное извлечение металлов из электронного лома [12, 13]. Управленческие решения должны быть согласованы на трёх уровнях. На корпоративном уровне это KPI по рециклингу, цифровая прослеживаемость, сервитизация и возврат продукции. На государственном — расширенная ответственность производителя, инфраструктура сбора и сортировки, гармонизация стандартов, финансирование пилотных проектов. На международном — принципы ответственного снабжения и обмен технологиями [2, 8, 9, 12, 14].

Ресурсный потолок – это прежде всего управленческая проблема, а не геологическая данность. Стратегия устойчивого развития без измеримых показателей рециклинга критических материалов остаётся декларацией, а менеджмент должен учитывать не только денежный поток, но и материальный след деятельности. Для России, которая формирует компетенции в переработке техногенного сырья, окно возможностей пока открыто.

Список литературы

1. Минералы для климатических действий : доклад / Всемирный банк. – Вашингтон, 2023. – URL: https://documents.vsemirnyjbank.org (дата обращения: 29.09.2026).
2. Обеспечение энергоперехода: принципы ответственного снабжения критическими энергопереходными минералами : доклад / Программа ООН по окружающей среде (ЮНЕП). – Найроби, 2024. – URL: https://www.un.org (дата обращения: 29.09.2026).
3. Binnemans K. Recycling of rare earths: a critical review / K. Binnemans [et al.] // Journal of Cleaner Production. – 2013. – Vol. 51. – P. 1–22. – DOI 10.1016/j.jclepro.2012.12.037.
4. The Role of Critical Minerals in Clean Energy Transitions / International Energy Agency. – Paris : IEA, 2021. – URL: https://www.iea.org (дата обращения: 29.09.2026).
5. Study on the Critical Raw Materials for the EU 2023 : final report / European Commission, Joint Research Centre. – Luxembourg : Publications Office of the European Union, 2023. – DOI 10.2873/725585.
6. Rademaker J. H. Recycling as a Strategy against Rare Earth Element Criticality / J. H. Rademaker, R. Kleijn, Y. Yang // Environmental Science & Technology. – 2013. – Vol. 47, № 18. – P. 10129–10136. – DOI 10.1021/es305007w.

7. Об установлении рамок для обеспечения безопасных и устойчивых поставок критических сырьевых материалов : Регламент (ЕС) 2024/1252 Европейского парламента и Совета от 11 апреля 2024 г. // Официальный журнал Европейского союза. – 2024. – L 125. – URL: https://eur-lex.europa.eu (дата обращения: 29.09.2026).
8. О батареях и отработанных батареях : Регламент (ЕС) 2023/1542 Европейского парламента и Совета от 12 июля 2023 г. // Официальный журнал Европейского союза. – 2023. – L 191. – URL: https://eur-lex.europa.eu (дата обращения: 29.09.2026).
9. Критические сырьевые материалы для энергоперехода: уязвимости и рекомендации по политике для ЕС : специальный доклад 04/2026 / Европейская счётная палата. – Люксембург : ЕСП, 2026. – URL: https://www.eca.europa.eu (дата обращения: 29.09.2026).
10. Доклад о разрыве циркулярности 2025 / Circle Economy. – Амстердам : Circle Economy, 2025. – URL: https://circle-economy.com (дата обращения: 29.09.2026).
11. Барьеры циркулярности в металлургической отрасли: аналитическая рамка эффектов обратной связи и блокировки // Mineral Economics. – 2025. – DOI 10.1007/s13563-025-00540-8.
12. Hunger T. Securing Critical Raw Materials Through Circular Economy Policy / T. Hunger, M. G. Arnold // Journal of Circular Economy. – 2026. – Vol. 4, № 1. – DOI 10.55845/joce-2026-41317.
13. В Самарской области запустили проект по извлечению редкоземельных металлов из электронного лома // Минпромторг России. – 2025. – 8 апреля. – URL: https://minpromtorg.gov.ru (дата обращения: 29.09.2026).
14. Перечень поручений по итогам Восточного экономического форума : поручение Президента Российской Федерации от 4 ноября 2025 г. // Президент России : официальный сайт. – 2025. – URL: http://www.kremlin.ru (дата обращения: 29.09.2026).
15. Редкоземельные металлы из электронного лома: новый проект в России // Hi-Tech Mail. – 2025. – 9 апреля. – URL: https://hi-tech.mail.ru (дата обращения: 29.09.2026).